


# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

 **Aktenzeichen:** 101 28 038.6

**Anmeldetag:** 08. Juni 2001

**Anmelder/Inhaber:** Forschungszentrum Karlsruhe GmbH,  
Karlsruhe/DE

**Bezeichnung:** Mikrowellentechnischer Durchlauferhitzer

**IPC:** H 05 B, B 01 L, F 24 H

 Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 04. Oktober 2002  
Deutsches Patent- und Markenamt

Der Präsident

Im Auftrag

Faust

Forschungszentrum  
Karlsruhe GmbH  
ANR 5661498

Karlsruhe, den 05. Juni 2001  
PLA 0128 Mh/la



**Mikrowellentechnischer Durchlauferhitzer**

Forschungszentrum  
Karlsruhe GmbH  
ANR 5661498

Karlsruhe, den 05. Juni 2001  
PLA 0128 Mh/la

### Patentansprüche

1. Mikrowellentechnischer Durchlauferhitzer zum Erwärmen fluider Medien, bestehend aus:

- einer Mikrowellenquelle,
- einem an den Ausgang der Mikrowellenquelle direkt oder über einen Rechteckhohlleiter angeflanschten Applikator mit ebenfalls rechteckigem Querschnitt,
- einer Last in Form eines mit dem zu erwärmenden Medium durchflossenen dielektrischen Rohres, das parallel zur Achse der Einkoppelöffnung für die Mikrowelle in den Applikator steht und senkrecht auf die jeweilige Längsachse der zwei einander gegenüberliegenden Seitenwänden stößt, wovon in der einen Seitenwand davon die Mikrowelleneinkoppelöffnung sitzt,
- je einem metallischen Rohrstutzen an den beiden Enden des dielektrischen Rohres, der fluiddicht an der Stoßstelle des dielektrischen Rohres und mikrowellendicht an der entsprechenden Seitenwand des Applikators ansetzt,

wobei

die Rechteckgeometrie des Applikators an die von der Mikrowellenquelle emittierten Mikrowelle der Wellenlänge  $\lambda$  derart angepasst ist, dass im Applikator der linear polarisierte Grundmode  $TE_{10}$  angeregt wird,

die Achse des dielektrischen Rohrs parallel zur Feldpolarisation des linear polarisierten  $TE_{10}$ -Modes sowie mit dem Abstand von etwa  $\lambda/4$  zur jeweils nächstliegenden Stirnseite des Applikators steht, und die Rohrachse des dielektrischen Rohrs mit dem Ort des Feldmaximums des linear polarisierten  $TE_{10}$ -Modes zusammenfällt,

der Abstand zwischen der Achse der Mikrowelleneinkoppelöffnung und der des dielektrischen Rohrs so eingestellt ist, dass die in den Applikator eingekoppelte Feldenergie in dem fluiddurchströmten dielektrischen Rohr, der Last, mindestens nahezu oder völlig absorbiert und damit in Wärme darin umgewandelt wird, sodaß sich im Applikator nur mehr vernachlässigbare oder gar keine Reflexionen ausbilden,

die lichte Weite der beiden Rohrstutzen ab der jeweiligen Applikatorwand zunächst gleich dem Außendurchmesser  $d$  des dielektrischen Rohrs ist, und zwar in Bezug auf die Mikrowellenlänge  $\lambda$  über eine Länge  $l$  von

$$\lambda/4 < l < \lambda/2$$

und anschließend von der relativen Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon_r$  abhängig über eine Länge  $> \lambda/4$  derart verjüngt ist, dass dort ein vollständiger Cut-Off für die Mikrowelle besteht.

2. Mikrowellentechnischer Durchlauferhitzer nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das dielektrische Rohr inert gegenüber des durchströmenden, zu erwärmenden Mediums ist.
3. Mikrowellentechnischer Durchlauferhitzer nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die der Last nächststehende Stirnwand des Applikators zur Ausbildung des Grundmodes  $TE_{10}$  auf der Applikatorlängsachse justierbar ist.
4. Mikrowellentechnischer Durchlauferhitzer nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Mikrowellenquelle, in ihrer Art an der Nennleistung orientiert, ein Magnetron oder ein Klystron oder ein Backward-Wave-Oscillator, BWO, oder eine sonstige für die notwendige Mikrowellenleistung technisch geeignete Mikrowellenröhre ist.

## **Beschreibung**

Die Erfindung betrifft einen mikrowellentechnischen Durchlauferhitzer zum Erwärmen fluider Medien.

Die Mikrowelle eignet sich zum Erwärmen in vielfältiger Form. Sie findet daher Einsatz in der Ernährungsindustrie, im Haushalt, in der Medizin, in der industriellen Materialprozessierung in unterschiedlicher Weise, sei es, dass ein Prozessgut einfach angestrahlt wird, sei es, dass ein Applikator Bestandteil einer mikrowellentechnischen Anlage zur Erwärmung ist, wie etwa die hinlänglich bekannte Haushaltsmikrowelle oder bei der Temperierung und Thermostatisierung eines Wärmebades in der Materialbearbeitung.

Letzteres ist aus der DE 199 35 387 bekannt. Dort ist an einer Seitenwand des Beckens der Mikrowellen-Applikator angebracht, der eine Seitenwand mit dem Becken gemeinsam hat. Diese Wand besteht aus einem Gitter, das eine Maschenweite hat, die die Mikrowelle nicht mehr durchtreten läßt, wohl aber die Flüssigkeit des Bades im eigentlichen Nutzbecken und dem Applikator durch die Gitterwand hindurch zirkulieren bzw. umgewälzt werden kann.

Solche Aufbauten sind recht komplex, wenn der mikrowellentechnische Teil und der Nutzbereich, von außen gesehen, eine bauliche Einheit bilden. Damit einher gehen Schutzmaßnahmen, die aufgrund der räumlichen Enge gewichtige Beachtung finden müssen.

Aufgabe ist, eine Einrichtung zur Erwärmung von Flüssigkeiten/Fluiden bereitzustellen, die einen einfachen Aufbau hat, ohne aufwendigen Montageaufwand an eine Prozesseinrichtung oder verfahrenstechnische Anlage angekoppelt werden kann und vom eigentlichen Prozeß räumlich getrennt gehalten wird.

Die Aufgabe wird durch einen mikrowellentechnischen Durchlauferhitzer zum geführten Erwärmen fluider Medien gemäß den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Die Mikrowellenquelle der Einrichtung hat eine Auskoppelinrichtung/Antenne, die je nach räumlicher Vorgabe direkt oder über einen Rechteckhohlleiter an die Mikrowel-

leneinkoppelöffnung in der Seitenwand eines rechteckigen Applikators angeflanscht ist.

Die Last ist ein mit dem zu erwärmenden Medium durchströmtes dielektrisches Rohr, das parallel zur Achse der Einkoppelöffnung für die Mikrowelle zwischen zwei zueinander parallelen Seitenwänden des Applikators eingebaut ist und auf der Längsachse der jeweiligen Seitenwand stößt.

An das dielektrische Rohr schließt sich an seinen beiden Enden nach außen hin je ein metallischer Rohrstutzen an, beide freien Enden sind an einen Strömungskreislauf angeschlossen. Beide Rohrstutzen setzen einerseits fluid/gasdicht am jeweiligen Ende des dielektrischen Rohres an und sind andererseits mindestens mikrowellendicht, aber auch mechanisch hinreichend stabil an der jeweiligen Seitenwand des Applikators angeflanscht, hart angelötet oder angeschweißt.

Die Geometrie des mikrowellentechnischen Aufbaus wird von der Wellenlänge  $\lambda$  der von der Quelle ausgekoppelten Mikrowelle und der Ausbildung des linear polarisierten Grundmodes  $TE_{10}$  bestimmt. Damit liegt der Applikator in seiner Geometrie als Rechteckhohlleiter fest.

Die Achse der Mikowellen-Einkoppelöffnung und die Längsachse des dielektrischen Rohrs stehen parallel zueinander, beide Achsen stehen senkrecht zu zwei einander gegenüberliegenden Applikatorwänden und gehen durch deren jeweilige Längsmittellinie. Beide haben einen Abstand von etwa  $\lambda/4$  zur jeweils nächstliegenden Stirnseite des Applikators.

Der Abstand zwischen der Antenne und dem dielektrischen Rohr ist so groß ist, dass die in den Applikator eingekoppelte Mikrowelle in dem in dem dielektrischen Rohr durchströmenden Fluid, der Last, nahezu völlig oder völlig dissipiert. Zur Feinabstimmung oder Feineinstellung ist deshalb die der Last naheliegende Stirnseite im Gegensatz zu der der Mikrowelleneinkoppelöffnung naheliegenden justierbar, d.h. sie kann mikrowellentechnisch auf die Last justiert werden und ist damit ein Kurzschlußschieber. Diese Einrichtung erübrigt sich nach entsprechender, last- und

damit material- bzw. mediumabhängiger Einstellung des Abstandes, wenn stets nur eine Sorte Medium erwärmt werden soll.

Das dielektrische Rohr, in dem das zu erwärmende Medium durchströmt, kann maximal den lichten Abstand der beiden einander gegenüberliegenden Applikatormantelwände haben, zwischen denen das Rohr hindurchgeht. Das dielektrische Rohr verläuft mittig zwischen den beiden Applikatormantelwänden und senkrecht zu den andern beiden, mit denen es stößt. Die durchströmende Flüssigkeit wird volumetrisch erwärmt, im allgemeinen über den lichten Querschnitt des dielektrischen Rohres nicht gleichmäßig sondern im wesentlichen im Profil, etwa eine Sinusform, des linearpolarisierten Grundmodes  $TE_{10}$ , der für die maßgebliche leistungsstarke Aufwärmung vorgesehen ist. Da die Längsachse des Rohres mit dem Feldmaximum, der Amplitude des elektrischen Feldes und mit der Polarisationsrichtung des linear polarisierten Grundmodes  $TE_{10}$  zusammenfällt, ist daraus ersichtlich, wie gut die gleichmäßige Erwärmung des durchströmenden Mediums, über den lichten Querschnitt gesehen, ist: in naher radialer Umgebung ist sie konstant, in größerer radialer Entfernung nimmt sie ab. Das Konstanz- bzw. Abnahmeverhalten kann durch den ähnlichen Verlauf des linear polarisierten Grundmodes über den Applikatorquerschnitt wie der einer sinusförmigen Halbwelle veranschaulicht werden. Nahe der Mitte zwischen zwei einander gegenüberstehenden Seitenwänden des Applikators ist es etwa konstant entsprechend  $\sin(\pi/2)$ , darüber hinaus ist der Verlauf ähnlich wie  $\sin \alpha$ , für  $0 < \alpha < \pi$

Die lichte Weite der beiden Rohrstutzen ab der jeweiligen Applikatorwand ist zunächst gleich dem Außendurchmesser des dielektrischen Rohrs. In Bezug auf die Mikrowellenlänge  $\lambda$  bewegt sich diese Teillänge  $l_0$  in dem Bereich

$$\lambda/4 < l_0 < \lambda/2.$$

Weiter nach außen hin sind die beiden Rohrstutzen in ihrer lichten Weite über eine Länge  $l_{\text{cut-off}} > \lambda/4$  derartig verjüngt, dass für die Mikrowelle abhängig von der relativen Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon_r$  des zu erwärmenden Mediums dort Cut-Off-Bedingungen für die Mikrowelle bestehen, sie dort also nicht in die Umgebung austreten kann.

In den Unteransprüchen sind noch weitere Maßnahmen beschrieben, mit denen der Durchlauferhitzer vorteilhaft ausgestattet werden kann.

An das dielektrische Rohr werden außer der elektrischen Eigenschaft, dass es fluid-dicht ist, keine weiteren außergewöhnlichen Forderungen gestellt. Es muß natürlich gegenüber der berührenden, zu erwärmende Flüssigkeit inert sein. All diese Forderungen erfüllt sehr gut Aluminiumoxid, das hinsichtlich des durchströmenden Fluids lediglich auf sein chemisches Verhalten, d.h. seine Reaktionsträgheit hin überprüft werden muß. Beispielsweise ist  $\text{Al}_2\text{O}_3$  für die Mikrowelle von 700 MHz bis 25 GHz nahezu völlig transparent, d.h. es gibt nur mehr geringe bzw. gar keine Mikrowellen-ankopplung und damit keine problematische Erwärmung des dielektrischen Rohres. Dieses Überprüfen gilt aber für alle dielektrischen Materialien, die als Rohrwand in Frage kommen. Glas, Quarzglas, um weitere Beispiel zu nennen, kommen deshalb auch in Betracht.

In Anspruch 3 wird die Feinabstimmungsmöglichkeit mit der der Last naheliegenden Stirnwand des Applikators aufgeführt. Diese technische Einrichtung ist ein Kurzschlusschieber und nur bei elektrisch unterschiedlichen Medien notwendig. Bei ein und demselben, zu erwärmenden Medium kann diese Stirn wie die gegenüberliegende von Anbeginn an schon fest eingebaut sein, bzw. ist fest eingebaut.

Welcher Typ Mikrowellenquelle im Einzelfall eingesetzt wird, orientiert sich am Leistungsbedarf und der Frequenz  $\nu$  bzw. Wellenlänge  $\lambda$  der Mikrowelle. Das technische heute völlig ausgereifte Magnetron dürfte in Leistungsbereichen  $< 10$  kW konkurrenzlos sein (Anspruch 4). Der rechteckige Hohlleiter samt Applikator haben eine einfache, an der Betriebsfrequenz orientierte Geometrie. Im Grunde könnte damit jede Frequenz verwendet werden, solange es dafür auch die entsprechend leistungsstarken Mikrowellenquellen gibt.

Mit dem mikrowellentechnischen Durchlauferhitzer könne sowohl polare Fluide/Flüssigkeiten aufgrund des volumetrischen Erhitzens gelenkt erwärmt werden, aber auch - und das ist der Vorzug - mit wirtschaftlichem Wirkungsgrad nichtpolare. Unter polaren Fluiden werden Flüssigkeiten verstanden, deren Moleküle ein permanentes elektrisches Dipolmoment haben, wie Wasser, Säuren, Ölsäuren und



dergleichen. Dadurch können bekanntermaßen elektrische Felder gut ankoppeln. Die komplementäre Gruppe der nichtpolaren besteht aus Molekülen, die dieses elektrische Dipolmoment nicht permanent haben, sind also meist organischer Natur wie säurefreie Öle und Fette, Alkohole, um nur einige zu nennen. Bei beiden Arten ist das volumetrische Erwärmen maßgebend.

Der mikrowellentechnische Durchlauferhitzer ist ein technisch sehr einfacher Aufbau, der komplett aus Standardkomponenten besteht. Mikrowellentechnische Abschirmmaßnahmen zur Umwelt hin bestehen gewissermaßen schon inhärent, da die Mikrowellenquelle als Baugruppe üblicherweise schon als mit Metallgehäuse umgeben Quelle, versehen mit Kühlrippen und Gebläse zur Kühlung oder Kühlrippen mit kühlmitteldurchströmbaren Kanälen, die an einen Kühlkreislauf angeschlossen werden standardmäßig angeboten wird und damit gegebenenfalls leicht zwangsgekühlt werden kann. Der Applikator ist unmittelbar oder über ein kurzes Hohlleiterstück angeflanscht. Über die beiden metallischen Rohrstutzen, die an den beiden Enden des dielektrischen Rohrs ansetzen, ist die Schließung des Strömungskreislaufs mit zwei Schlauchanschlüssen einfach erledigt.

Vorteilhaft ist insbesondere auch die räumliche Entkopplung der mikrowellentechnischen Einrichtung von der Nutzung des erwärmten Fluids. Das bedeutet, dass nur die mikrowellentechnische Einrichtung zur Umgebung hin sicher abgeschirmt werden muß, nicht aber die Einrichtung, wie ein Wärmebad, ein Radiator, eine Temperiereinrichtung oder sonst eine in dieser Art brauchbare Erwärmungseinrichtung in Verfahrensanlagen, in der das erwärmte Fluid schließlich genutzt wird. An dieser Stelle sei der Vollständigkeit halber erwähnt, dass statt des Fluids auch prinzipiell ein Gas auf diese Weise erwärmt werden könnte, sofern die Mikrowelle im lichten Bereich des dielektrischen Rohrs überhaupt brauchbar, d.h. konkurrierbar mit andern Erwärmungssystemen ankoppeln würde.

Ein weiterer wirtschaftlicher Vorteil ist darin zu sehen, dass bei auf die fluid-durchströmte Last angepasster Applikatorgeometrie ein Zirkulator als Schutz für in die Mikrowellenquelle zurücklaufende Wellen nicht mehr notwendig ist, da die von der Quelle emittierte Welle vollständig in der Last dissipiert und damit in Wärme ge-

wandelt wird. Ein solcher wäre redundant und daher nur als zusätzlich Schutz-  
einrichtung eingebaut.

Im Applikator besteht bei wohl angepasster Geometrie die Situation der elektromag-  
netischen Quelle in Form der Antenne bzw. Einkoppelöffnung und der ohne Refle-  
xion aufnehmenden Senke, in Form der gesamten Last aus dielektrischem Rohr und  
darin durchströmendem Fluid, wobei bei der technischen Auslegung darauf geachtet  
wird, dass die eingekoppelte elektromagnetische Energie ins durchströmenden Fluid  
völlig, zumindest aber hauptsächlich dissipiert. Bei Puls-Breitengeregeltem Betrieb  
der Mikrowellenquelle kann die Leistung der Einrichtung kontinuierlich von Null bis  
auf Nennleistung geregelt werden.

Die Erfindung wird im folgenden anhand der Zeichnung näher beschrieben. Die  
Zeichnung besteht aus den Figuren 1 bis 3. Sie zeigen:

Figur 1 den Applikator,

Figur 2 die Intensitätsverteilung im beladenen Applikator bei Abstimmung,

Figur 3 die Intensitätsverteilung im leeren Applikator.

Der im folgenden beschriebene mikrowellentechnische Durchlauferhitzer arbeitet bei  
der Mikrowellen-Frequenz  $\nu = 2,45 \text{ GHz}$ , das ist der Wellenlänge  $\lambda \approx 12 \text{ cm}$  im Va-  
kuum äquivalent. Die Geometrie orientiert sich daran. Zwei weiter nutzbare ISM-Fre-  
quenzen sind die niedrigere von 915 MHz und die höhere von 5,85 GHz beispiels-  
weise. Technisch einsetzbare Mikrowellenquellen sind dafür noch standardmäßig zu  
bekommen.

Im jetzt beschriebene Ausführungsbeispiel wird als Mikrowellenquelle ein Magnetron  
eingesetzt. Es hat beispielhaft die folgenden technischen Daten:

Mikrowellenleistung 1000 W,

Frequenz 2,45 GHz,

Spannung 4,2 kV,

Strom 0,33 A.

Das Magnetron bildet mit seiner Kühleinrichtung meist schon ab Werk eine bauliche  
Einheit. An seinen Kopf ist der rechteckige Hohlleiter offen und dort mit einem Kop-

pelflansch versehen. Daran flanscht der Applikator an, an dessen nahe der Einkoppelöffnung liegenden Stirn zum eventuell notwendigen Leerpumpen ein Evakuierungsstutzen ansetzt. Die andere Stirn des Applikators sitzt entweder fest oder ist als Kurzschlusschieber ausgebildet.

Figur 1 zeigt diese Situation nicht in diesem Umfang. Es wird lediglich der quaderförmige Applikator dargestellt, der hier beispielsweise aus Aluminium ist. In seiner oberen Deckwand ist die Öffnung für die Mikrowelleneinkopplung. Weiter auf der Längsachse in der Figur nach links ist zwischen der Deck- und Bodenwand des Applikators das dielektrische Rohr eingebaut, hier ein Keramikrohr aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Nach außen hin setzen daran auf der einen Seite der metallisch geschirmte Abfluss und auf der andern Seite der metallisch geschirmte Zufluss an. Jeweils daran schließt der Übergang auf den Schlauch des Kreislaufs an.

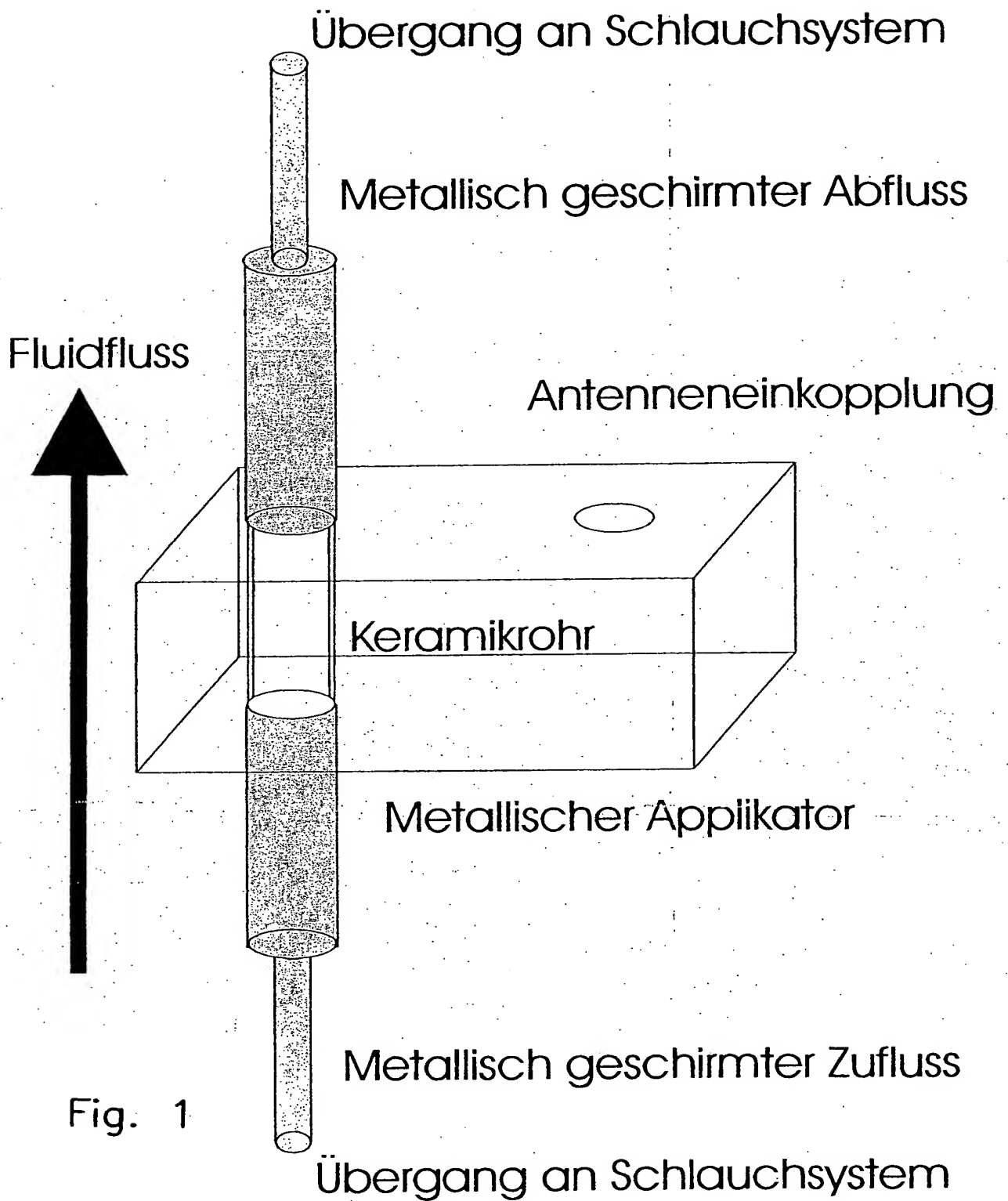
In Figur 2 ist der elektromagnetische Zustand im Applikator bei auf den Lastfall abgestimmter Geometrie auf der zur Einkopplungsebene parallelen Mittelebene durch den Applikator dargestellt, d.h. der Applikator bzw. das dielektrische Rohr ist fluid-durchströmt. In der Nähe der im Bild rechts oberen Stirnwand,  $\lambda/4$ -Abstand  $\approx 3$  cm, ist die Quelle, also die Einkopplung der Mikrowellenenergie mit zunächst noch hoher Energiedichte relativ zum weiteren Innern des Applikators. In der Nähe der im Bild links unteren Stirnwand, im lastabhängigen  $\lambda/4$ -Abstand davon versinkt die gesamte elektromagnetische Energie, d.h. sie wird volumetrisch in der strömende Last in thermische Energie dissipiert. Bei dieser Situation gibt es keine Reflexion/Resonanz im Applikator, die Mikrowelle wird in der Last völlig aufgesaugt. Zum anschaulichen Vergleich zeigt Figur den lastlosen Fall, der sich durch die Reflexion/Resonanz im Applikator darstellt. Dieser Resonanzfall ist zu vermeiden, da ohne einen Zirkulator zwischen der Mikrowellenquelle, hier dem Magnetron, und der Einkoppelöffnung im Applikator, dieselbe durch Rückwärtseinkopplung aus dem Applikator gefährdet wäre. Ganz allgemein muß die Rückwärtseinkopplung in eine Mikrowellenquelle durch Anpassung vermieden oder zumindest bis auf ein tolerables Maß durch Schutzmaßnahmen wie den Zirkulator unterdrückt werden.

Die Baugruppe der standardmäßig verwendeten Mikrowelle, also die Mikrowellenquelle als solche mit ihrer Kühleinrichtung in Form eines Gebläses oder in Form einer

Kühlschlangengruppe, an wärmeabzuführender Stelle ankoppelnd, die Stromversorgung mit Steuer- und Schalteinrichtung, ist nicht angedeutet, da die für die Erläuterung der Erfindung die Einkoppelöffnung am Applikator ausreicht. Dort koppelt bekanntermaßen die Auskoppelöffnung der Mikrowellenquelle direkt oder indirekt über ein Wellenleiterstück an. Weitere, technisch übliche Maßnahmen zu Überwachungs-, Schutz- und Steuerungszwecken sind in der Figur 1 der Übersicht und der Hervorhebung halber auch nicht angedeutet. Sie sind bekannt und werden bedarfsweise selbstverständlich eingesetzt.

### Zusammenfassung

Der mikrowellentechnische Durchlauferhitzer zum Erwärmen fluiden Medien besteht aus einer Mikrowellenquelle, die direkt oder indirekt an einen Applikator angeflanscht ist. Der Applikator ist ein quaderförmiger Resonatorraum, in dem auf einer Seitenwand die Mikrowelle über eine Öffnung einkoppelt und darin den linear polarisierten Grundmode  $TE_{10}$  anregt. Zwischen derselben Seitenwand und der gegenüberliegenden ist das dielektrische Rohr eingespannt, in der das zu erwärmende Fluid durchströmt. Beides, dielektrisches Rohr und durchströmendes Fluid im wesentlichen bilden die Last für die Mikrowellenquelle. Die Abstimmung der Einrichtung geschieht derart, dass die gesamte Mikrowellenenergie in die Last dissipieren kann.



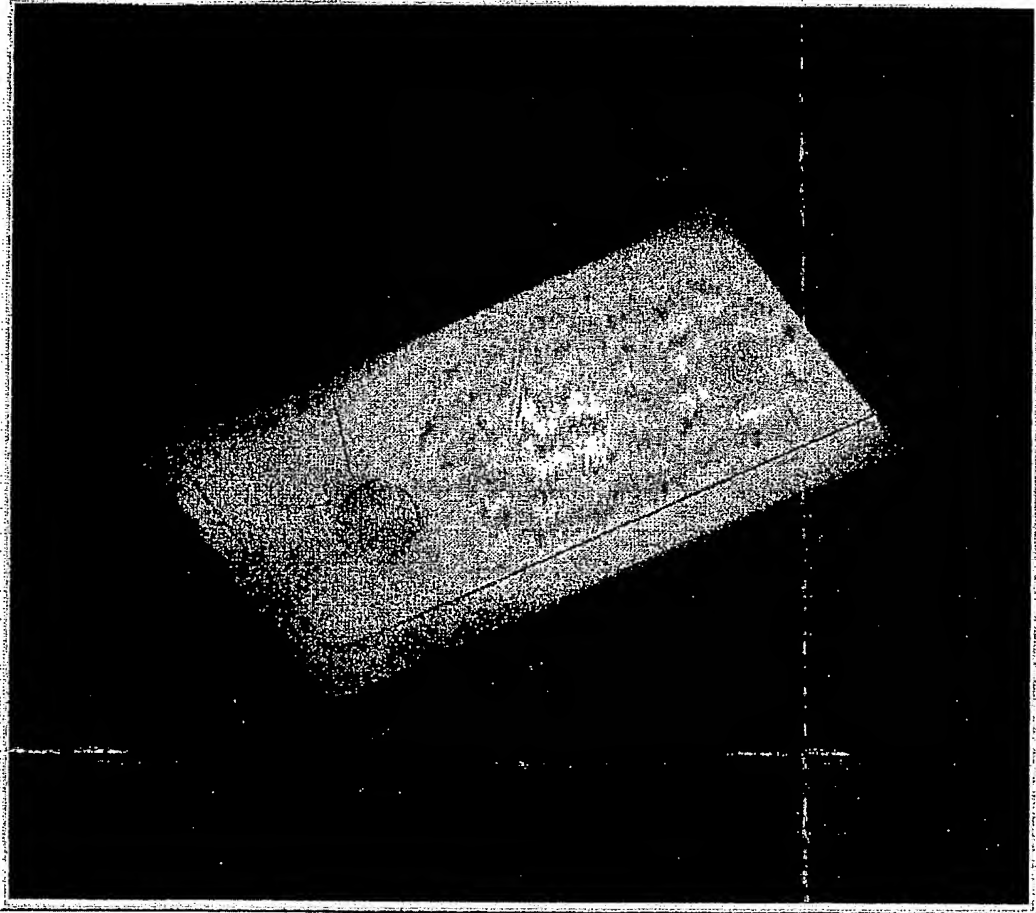


Fig. 2

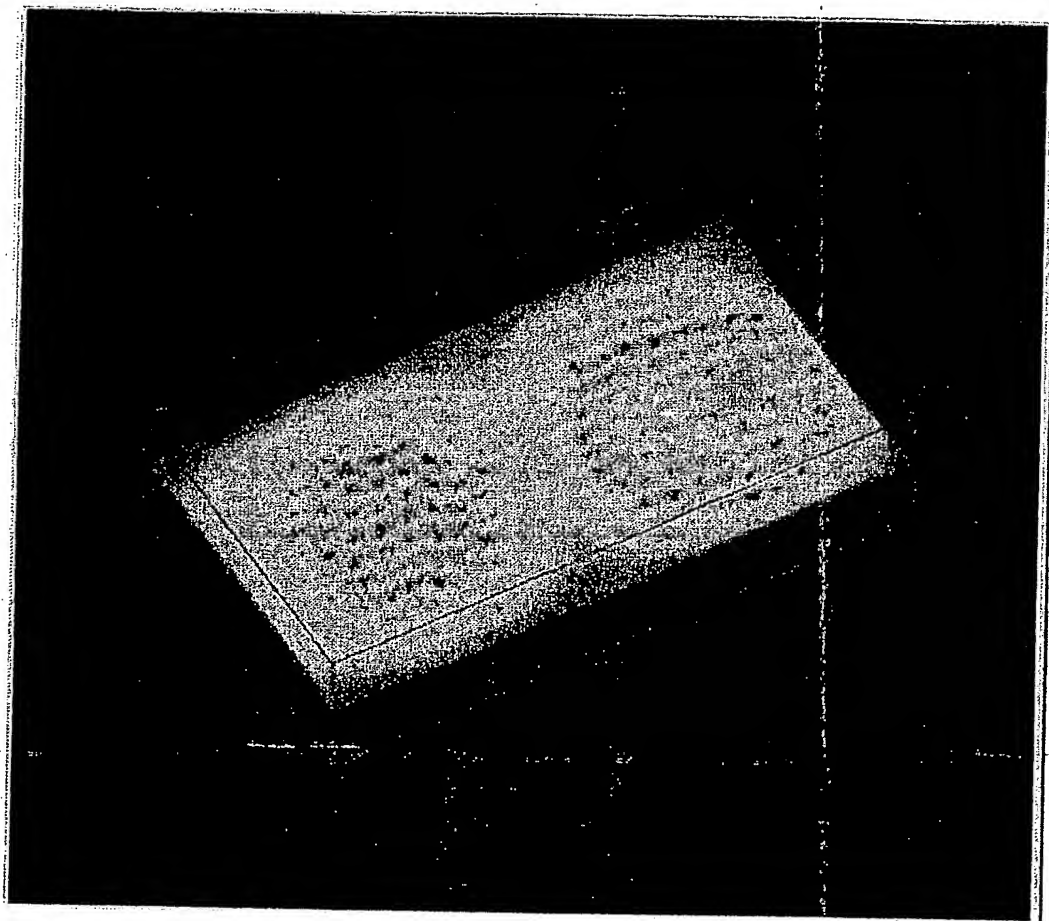


Fig. 3